

Estimarea stadiului tumorilor cerebrale utilizând analiza fractală

Ștefan-Răzvan ANTON^a, Viorel PĂUN^{a,b}

^a Facultatea de Științe Aplicate, Universitatea "Politehnica" din București.

^b Conducător științific.

REZUMAT

Analiza fractală a tumorilor cerebrale de tip Astrocitom, cu privire la stadiul acestora. Pentru acest scop folosim o serie de algoritmi de extragere și evidențiere a tumorii, iar pentru calcularea dimensiunii fractale utilizăm metoda "box-counting", ce permite analiza rapidă a imaginilor binare (alb-negru).

CUVINTE CHEIE

RMN, Astrocitom, analiză fractală, dimensiune fractală, box-counting

1. Introducere

Astrocitoamele sunt cele mai frecvente forme de tumori cerebrale, reprezentând 78 % din totalul tumorilor maligne [1], acestea avându-și originea în celulele astrogliale, un tip de celule gliale cu formă de stea și cu rol esențial în aprovizionarea țesutului nervos cu nutrienți.

Pentru a determina stadiul unei tumori sunt necesare proceduri invazive precum recoltarea unei mici cantități de țesut tumoral și analiza acesteia la microscop. Metode non-invazive, precum determinarea rugozității pielii au fost utilizate cu succes în detecția timpurie a cancerului de piele [2].

Analiza fractală este o metodă ce permite obținerea unei mărimi caracteristice obiectelor cu forme complexe și neregulate, atât de frecvente în natură, la toate scalele de marime [3]. Un alt concept important este reprezentat de rugozitatea interfeței țesut tumoral - țesut normal. În cazul tumorilor de tip Astrocitom, un stadiu înaintat este caracterizat de o invazie a țesutului normal de către celulele canceroase, apărând astfel o suprafață cu o rugozitate ridicată, ce poate fi caracterizată printr-o mărime numită exponentul de rugozitate locală.

În această lucrare ne propunem să evidențiem legătura dintre rugozitatea conturului unei tumori cerebrale de tip Astrocitom și stadiul acesteia. Lucrarea este organizată în modul următor:

în secțiunea următoare descriem algoritmi de extragere a tumorii și de calculare a dimensiunii fractale prin metoda "box-counting" și introducem noțiunea de exponent de rugozitate locală, secțiunea 3 este dedicată verificării corectitudinii algoritmilor de extragere și de calculare a dimensiunii fractale, în secțiunea 4 se enumeră și interpretează rezultatele, iar în secțiunea 5 se formulează o concluzie și se discută aplicabilitatea metodei pentru alte tipuri de tumori.

2. Analiza Fractală a tumorii

2.1. Algoritmul de extragere a tumorii

Algoritmul este compus din următoarele etape:

Separarea scanării RMN în 150 de slide-uri 2D, luate pe planul orizontal.

Binarizarea fiecărui slide prin procesul descris de Despotović et al. [4]. Acest proces presupune aplicarea unui filtru de intensitate, ce păstrează pixelii cu o valoare a intensității culorii gri cuprinsă între anumite limite.

Detectarea marginilor tumorii prin aplicarea operatorului Sobel [5].

Reasamblarea celor 150 de slide-uri într-un model 3D al tumorii.

2.2. Elaborarea algoritmului de "box-counting"

Pentru a înțelege modul în care funcționează algoritmul considerăm următoarele exemple:

O curbă de lungime L și o rigla de lungime s , $s \leq L$. Numărul de rigle $N(s)$ necesare pentru a acoperi curba când $s \rightarrow 0$ este proporțional cu s^{-1} .

O suprafață cu aria A și un pătrat de latură s , $s^2 \leq A$. Numărul de pătrate $N(s)$ necesare pentru a acoperi suprafața când $s \rightarrow 0$ este proporțional cu s^{-2} .

Un spațiu de volum V și un cub de latură s , $s^3 \leq V$. Numărul de cuburi $N(s)$ necesare pentru a acoperi volumul când $s \rightarrow 0$ este proporțional cu s^{-3} .

Relațiile de mai sus pot fi generalizate pentru un obiect fractal, ajungând la relația

$$N(s) \propto s^{-D},$$

unde, într-un spațiu tridimensional, $N(s)$ reprezintă numărul de cuburi necesare pentru a acoperi volumul obiectului, s reprezintă latura cuburilor, iar D reprezintă dimensiunea fractală a obiectului.

Algoritmul de "box-counting" este o metodă de selecție a datelor prin împartirea unui set

de date în bucăți din ce în ce mai mici, de obicei în formă de ”cutie”, și analizarea acestora la fiecare scală [6].

Metoda constă în numărarea cuburilor de latură s , necesare să acopere un obiect atunci când s variază după următoarea relație :

$$s_i = 2^i, \quad i \in 1, 2, 3, \dots, P,$$

unde P este cel mai mic număr întreg astfel încât $2^P \leq \min(a, b)$, cu a, b dimensiunile setului de date, în cazul nostru, lungimea și lățimea unui slide, în pixeli.

Dimensiunea fractală poate fi dedusă prin calcularea pantei graficului $\log(N(s))$ în funcție de $\log(s^{-1})$.

2.3. Exponentul de rugozitate locală

Considerăm următoarea ecuație [7]

$$a_{loc} + d_F = d_E, \tag{1}$$

unde a_{loc} este coeficientul de rugozitate locală, d_F este dimensiunea fractală, iar d_E este dimensiunea Euclidiană a spațiului în care se află obiectul, în cazul nostru $d_E = 3$.

Să considerăm exemplul unei sfere, nefiind un fractal, dimensiunea fractală a acesteia este un număr întreg, egal cu 2.

Din Ec. 1 rezultă că exponentul de rugozitate locală a sferei este egal cu 1.

$$a_{loc} = 1.$$

Deducem că sfera este o structură cu suprafață perfectă, neprezentând rugozitate.

3. Verificarea algoritmilor

Verificarea corectitudinii algoritmului de extragere se poate realiza ușor, aplicându-l unui set de imagini în care zona tumorală este cunoscută și comparând rezultatul obținut cu realitatea.

Algoritmul a fost aplicat pe două tipuri de imagini, grupate astfel:

Grupul 1, 5 pacienți care prezintă tumori în stadiul I și II, cu forme aproximativ regulate și cu un singur nucleu.

Grupul 2, 5 pacienți care prezintă tumori în stadiul III și IV, cu forme neregulate și fragmentate.

Rezultatele astfel obținute au fost satisfăcătoare pentru grupul 1, algoritmul reușind să identifice corect conturul tumorii în toate cazurile.

Pentru grupul 2, algoritmul a identificat corect conturul tumorii doar în 1/5 cazuri, în restul de 4 cazuri rezultatele fiind nesatisfăcătoare pentru scopul cercetării Fig. 1-4.

Luăm decizia de a studia doar imagini ce conțin tumori de tip Astrocitom, în stadiul I și II.

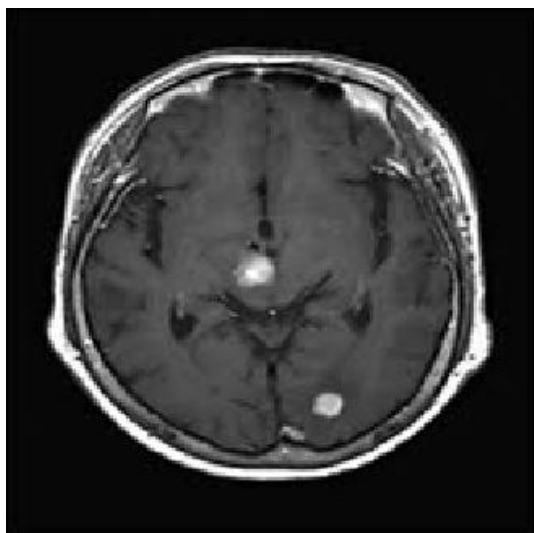


Figure 1. Tumoare în stadiul III ce prezintă 2 nuclee

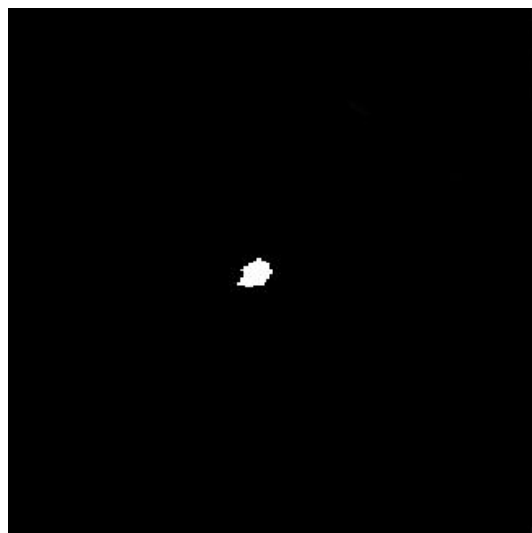


Figure 2. Algoritmul nu identifică în totalitate tumoarea.

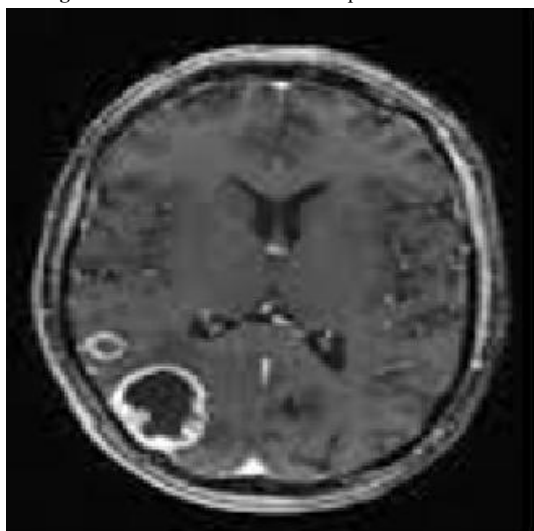


Figure 3. Tumoare în stadiul IV ce prezintă 2 nuclee și margini neregulate .

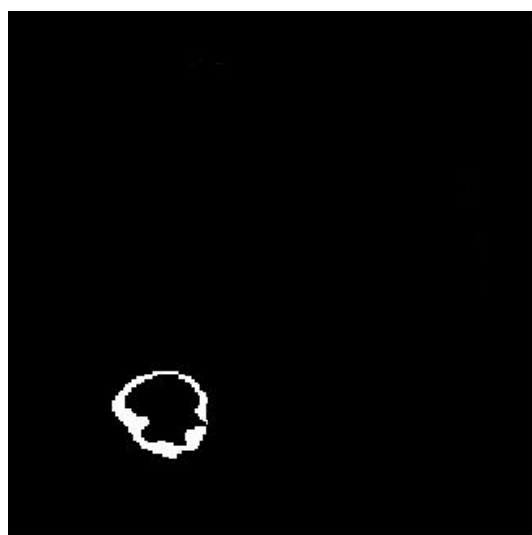


Figure 4. Algoritmul nu identifică în totalitate tumoarea.

Pentru a verifica corectitudinea algoritmului de "box-counting", îl aplicam unei sfere.

Datele obținute pot fi regăsite în Tabelul 1.

Table 1. Analiza fractală a unei sfere.

Obiect	Dimensiunea fracatală	Coeficientul de rugozitate locală
Sfera	2.014 ± 0.03	0.986 ± 0.03

Din secțiunea 2.3 cunoaștem dimensiunea fractală și exponentul de rugozitate locală a unei sfere ca fiind $d_F = 2$, respectiv $a_{loc} = 1$.

Observăm că a_{loc} calculat este aproximativ egal cu a_{loc} teoretic.

$$2.014 \pm 0.03 \approx 2$$

Având în vedere rezultatul astfel obținut, considerăm că algoritmul de "box-counting" este suficient de precis pentru scopul cercetării.

4. Rezultate și interpretarea lor

Procedeele descrise anterior au fost aplicate unui număr de 10 pacienți, împărțiți în 2 grupe, în modul următor:

Grupul 1, 5 pacienți cu tumori de tip Astrocitom în stadiul I;

Grupul 2, 5 pacienți cu tumori de tip Astrocitom în stadiul II.

Table 2. Analiza fractală a tumorilor de tip Astrocitom.

Grup	Stadiul tumorii	Dimensiunea fractală	Coeficientul de rugozitate locală
Grupul 1	I	2.17 ± 0.05	0.87 ± 0.05
Grupul 2	II	2.11 ± 0.09	0.89 ± 0.09

Aceste valori confirmă rezultatele obținute de Torres et al. [7], prin metoda "Scaling analysis" și încadrează grupurile 1 și 2 la categoria tumorilor de tip Astrocitom în stadiul I, respectiv stadiul II.

5. Concluzii

Analiza fractală este o unealtă puternică ce poate veni în ajutorul medicului prin caracterizarea non-invazivă a stadiului tumorilor. Pentru ca algoritmul descris în lucrare să poată fi aplicat

în spitale este necesară îmbunătățirea acestuia prin utilizarea de metode mai complexe și mai exacte de extragere și prelucrare a tumorii din imaginile RMN, dar și generalizarea tipurilor de tumori la care acesta poate fi aplicat. Din punct de vedere teoretic algoritmul poate fi modificat și aplicat oricărui tip de tumori al carei stadiu este caracterizat de nivelul de intruziune la nivelul celulelor normale. O posibilă idee de îmbunătățire rapidă a algoritmului este de programare a unei rețele neuronale și antrenarea acesteia să identifice stadiul unei tumori, plecând de la ideea de bază de segmentare și analiză, eliminând astfel factorul uman.

6. Mențiuni

Toate imaginile RMN au fost descărcate de pe www.cancerimagingarchive.net [8] [9], site accesat pe 05.05.2020.

References

- [1] Buckner, J. C., Brown, P. D., O'Neill, B. P., Meyer, F. B., Wetmore, C. J., Uhm, J. H. (2007). Central Nervous System Tumors. Mayo Clinic Proceedings, 82(10), 1271–1286. doi:10.4065/82.10.1271;
- [2] Del Carmen López-Pacheco, M. (2004). Early Detection of Skin Cancer by Microtopography. AIP Conference Proceedings. doi:10.1063/1.1811829;
- [3] Mandelbrot, Benoit B. 1983. The fractal geometry of nature;
- [4] Despotović, I., Goossens, B., Philips, W. (2015). MRI Segmentation of the Human Brain: Challenges, Methods, and Applications. Computational and Mathematical Methods in Medicine, 2015, 1–23. doi:10.1155/2015/450341;
- [5] https://en.wikipedia.org/wiki/Sobel_operator, site accesat pe 29.04.2020;
- [6] Paun Viore-Puiu, Analiza fractala. Box couting, lucrare nepublicata, 2019;
- [7] Torres Hoyos, F., Navarro, R. B., Vergara Villadiego, J., Guerrero-Martelo, M. (2018). Geometrical study of astrocytomas through fractals and scaling analysis. Applied Radiation and Isotopes. doi:10.1016/j.apradiso.2018.05.020;
- [8] Clark K, Vendt B, Smith K, et al. The Cancer Imaging Archive (TCIA): Maintaining and Operating a Public Information Repository. Journal of Digital Imaging. 2013; 26(6): 1045-1057. doi: 10.1007/s10278-013-9622-7;
- [9] Mamonov AB, Kalpathy-Cramer J. (2016). Data From QIN GBM Treatment Response. The Cancer Imaging Archive. DOI: 10.7937/k9/tcia.2016.nQF4gpn2;

DETECȚIA, ANALIZA ȘI CONTROLUL UNUI FRONT DE UNDĂ FOLOSIND TEHNICI DE OPTICĂ ADAPTIVĂ

Lupu Maria-Carla

Anul II, Master IALA, Facultatea de Științe Aplicate, Universitatea Politehnica din
București

Noțiuni introductive

Un parametru esențial al sistemelor laser CPA cu pulsuri de femtosecunde, în scopul accelerării de electroni și a surselor de radiație X, îl constituie intensitatea de vârf obținută în spotul fasciculului laser focalizat [1]. Pentru a obține valori ridicate ale intensității este necesară o energie mare a sistemului laser, o durată scurtă a pulsurilor și o dimensiune redusă a spotului laser. Introducerea unui nou etaj de amplificare în sistemul laser presupune costuri semnificative, iar durata pulsurilor este limitată de parametrii laser. De asemenea, din formula de calcul intensității, se observă că aceasta prezintă o dependență liniară față de energie și durată pulsului, și o dependență pătratică față de aria spotului laser:

$$I = \frac{E}{\Delta t \times \pi r^2}$$

În formula de mai sus E și Δt reprezintă energia și respectiv durata pulsului laser iar r este raza spotului focal măsurat la $1/e^2$ din intensitatea maximă [2].

Astfel, o modalitate eficientă de a crește valoarea intensității de vârf este de a îmbunătăți calitatea spotului laser focalizat. Impactul îmbunătățirii calității fasciculului constă atât în minimizarea dimensiunii spotului focal cât și în creșterea energiei în spotul focal care este cuantificat prin factorul Strehl.

Calitatea spațială a fasciculului laser este redusă din cauza aberațiilor introduse în urma propagării prin amplificatoarele sistemului laser. Aberațiile întâlnite în cadrul sistemelor laser de mare putere sunt aberații geometrice, datorate imperfecțiunilor și a dezinclinerii telescoapelor optice regăsite pe drumul fasciculului laser, aberații datorate efectelor termice în procesul de amplificare, și aberații cromatice, care apar din cauza propagării fasciculelor de bandă largă prin sisteme dispersive ce rezultă în diferențe de direcție a propagării între componentele spectrale ale fasciculului laser.

Această lucrare prezintă corecția frontului de undă al fasciculului emis de un sistem laser cu amplificator de tip CPA (Chirped Pulse Amplification), folosind un sistem de optică adaptivă, în scopul accelerării de electroni în jeturi de gaze nobile. Sistemul laser CETAL-PW are o putere de vârf pe puls de până la 1 PW (1 PW = 10^{15} W), cu durata pulsurilor de 25 fs (1 fs = 10^{-15} s) și energie 25 J. Sistemul este amplasat pe două etaje, separându-se partea ce cuprinde amplificatorul CPA față de incinta de interacție, unde fasciculul laser este focalizat și interacționează cu ținta. Schema sistemului este descrisă în figura de mai jos:

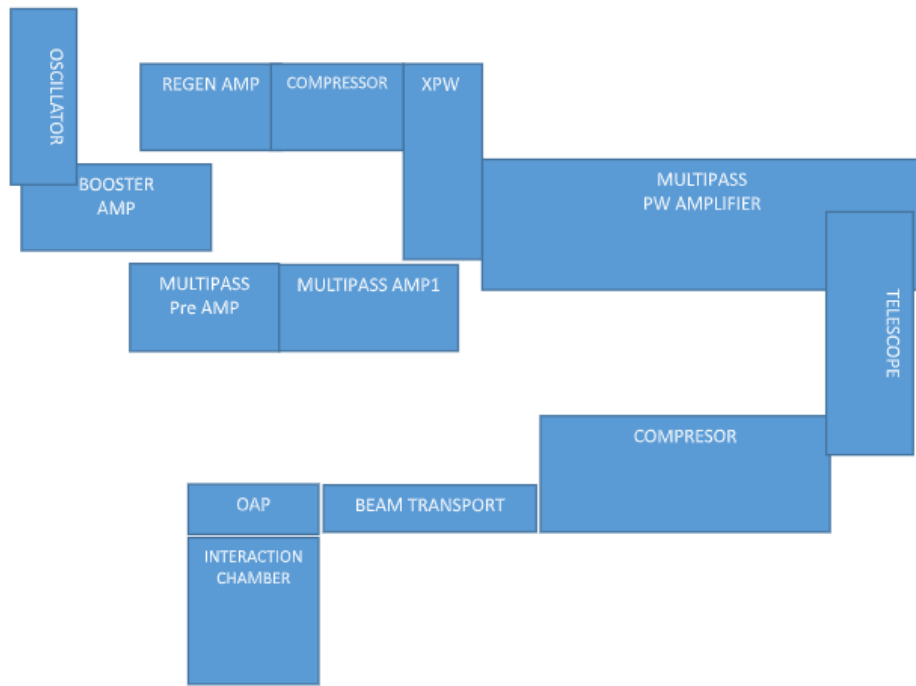


Fig.1. Schema sistemului laser CETAL – PW

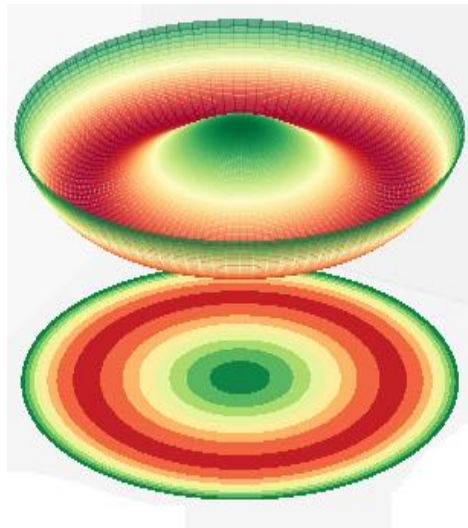
Caracteristicile spațiale a unui fascicul laser se pot separa în două elemente, acestea fiind profilul transversal de intensitate și profilul transversal de fază, care poate fi asociat frontului de undă. În timp ce caracterizarea profilului de intensitate se poate realiza în mod direct cu un detector CCD calibrat, măsurarea și controlul frontului de undă necesită o procedură mai complexă.

Frontul de undă reprezintă o suprafață de fază egală a undei în toată secțiunea transversală a fascicului laser. Un front de undă cu distorsiuni spațiale se poate descompune analitic într-o sumă de aberații, care sunt descrise de polinoame Zernike. Ponderea lor în structura frontului de undă este dată de coeficienți scalari care pot fi determinați prin măsurare cu senzori de front de undă.

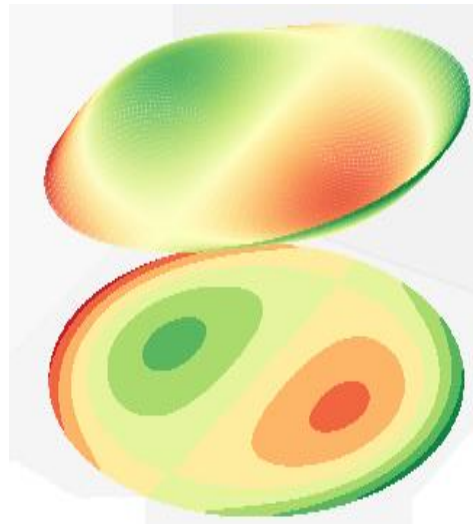
$$W(r, \theta) = \sum_{n, m} C_n^m Z_n^m(r, \theta)$$

În expresia frontului de undă W de mai sus, Z_n^m reprezintă polinoamele Zernike, iar C_n^m coeficienții acestora.

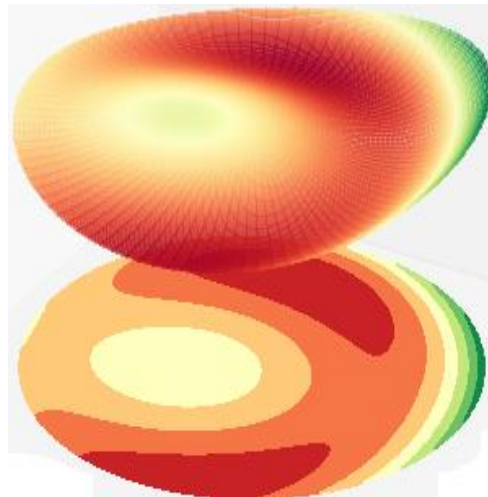
Polinoamele Zernike se influențează unele pe altele astfel încât un front de undă ce conține numeroase tipuri de aberații poate părea mai aproape de valoarea ideală decât un front descris de un singur polinom Zernike, situație descrisă în Fig.2.



a)



b)



c)

Fig.2. Suprafețe definite cu polinoame Zernike, ce prezintă: a) aberații sferice, b) coma, c) suma de coma, astigmatism și aberații de sfericitate [3]

Pentru compensarea distorsiunilor de fază spațială a fasciculului laser se folosește sistemul de optică adaptivă alcătuit din senzor de front de undă de undă, oglindă deformabilă și un software ce face legătura între cele două. Fig.3. reprezintă schema de principiu a sistemului de optică adaptivă, cu funcționare în buclă închisă și deschisă.

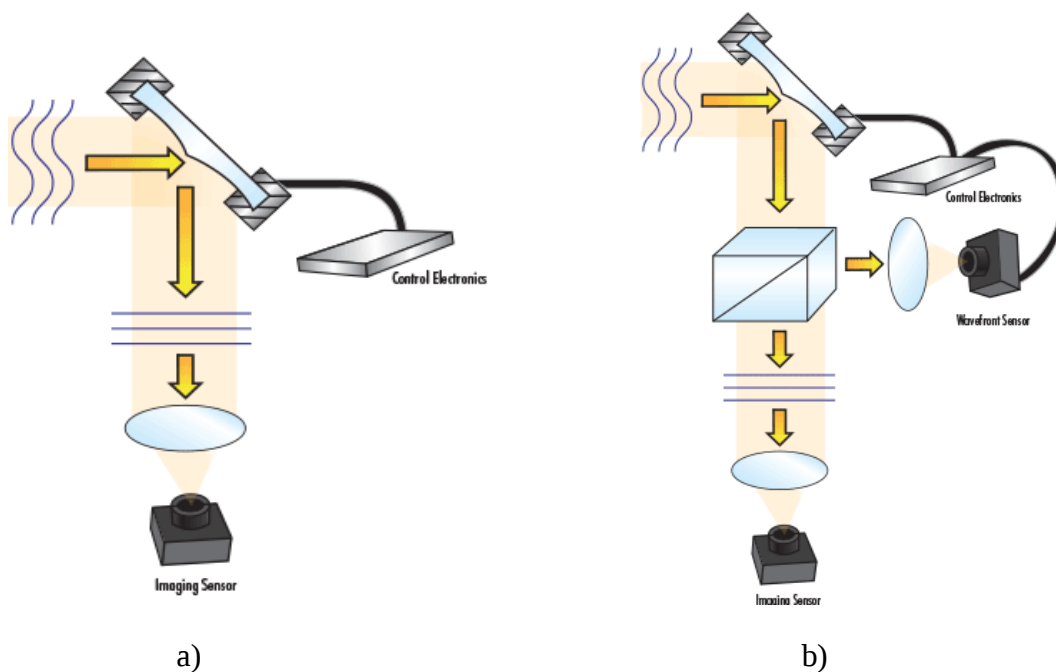


Fig.3. Schema de funcționare a sistemului de optică adaptivă în: a) buclă deschisă; b) buclă închisă [4]

În primul caz, frontul de undă laser incident, ce prezintă aberații, este corectat după reflexia pe oglinda deformabilă, rezultatul fiind vizualizat pe o cameră. În cazul b), de operare în buclă închisă, după reflexia frontului de undă pe oglindă, frontul rezultat este împărțit prin intermediul unui divizor de fascicul, partea reflectată de acesta fiind analizată de senzorul de front de undă. Dacă frontul de undă prezintă în continuare aberații, oglinda deformabilă va primi comenzi suplimentare corespunzătoare pentru a efectua corecția.

Aberațiile frontului de undă sunt analizate cu senzorul specializat (SID4 HR Phasics), iar prin intermediul programului de control se determină coeficienții polinoamelor Zernike care fitează frontul măsurat. Măsurarea frontului se realizează în urma comparării acestuia cu un front de undă de referință aproape ideal. Astfel, se găsesc comenzile necesare pentru ca oglinda să introducă distorsiunile necesare compensării distorsiunilor din fasciculul incident pentru transformarea în frontul de undă dorit. Pentru aceasta, la începutul procedurii de corecție, este necesară efectuarea calibrării oglinzii deformabile, pentru a obține matricea de calibrare ce face legătura între comenzile primite (tensiunile aplicate pe actuatorii oglinzii) și efectul acestora asupra frontului de undă a laserului.

Modul de lucru

Pentru a determina calitatea spațială a unui fascicul laser trebuie luate în considerare atât faza, cât și profilul de intensitate. Dacă fasciculul este aberat, nu va fi corect focalizat, energia va fi disipată în jurul părții centrale, și vor apărea modulații ale fazei și ale intensității [2].

Pentru a facilita utilizarea senzorului de front de undă, am implementat în sistemul laser setup-ul din Fig.4. Frontul de undă analizat provine de la o diodă laser cu lungimea de undă de 808nm ce a fost introdusă în sistemul laser după FRONT-END, și se propagă prin toate componentele optice ale amplificatorului laser, până în bunker, în camera de interacție.

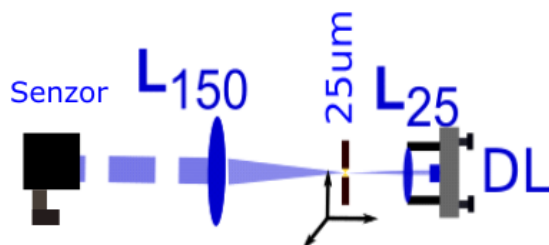
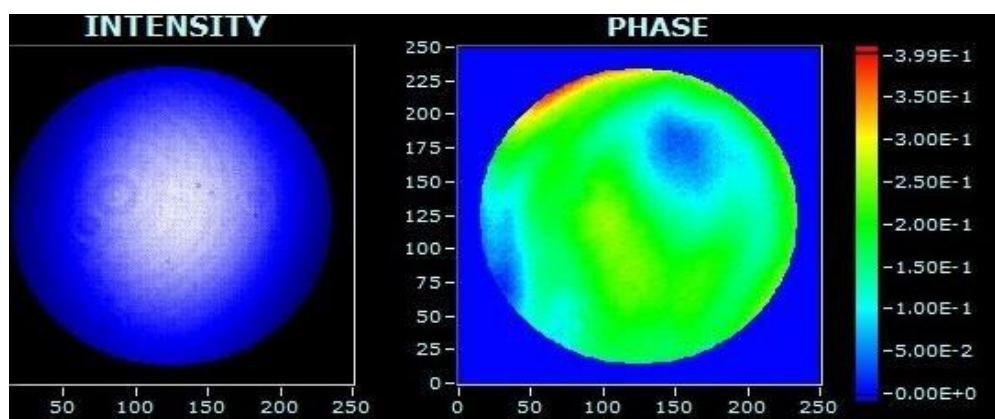


Fig.4. Montajul de analiză a frontului de undă a diodei laser

Profilul transversal de intensitate este modulată spațial în planul focal al primei lentile, cu distanța focală $f = 25\text{mm}$, prin intermediul unei aperturi de diametru $25\text{ }\mu\text{m}$ pentru eliminarea modurilor de ordin superior și a modulațiilor de fază. Poziționarea aperturii se realizează cu un sistem manual de translații (x,y,z) cu o precizie de 10 micrometri. După filtrarea spațială, fasciculul este colimat cu o lentilă de distanță focală $f = 150\text{ mm}$, ce îl aduce la o dimensiune de aproximativ 11 mm, și observat pe senzorul de front de undă.

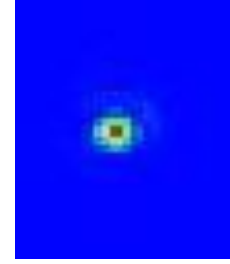
Interfața senzorului de front de undă poate fi observată în Fig.5. Acesta oferă informații cu privire la distribuțiile de fază și de intensitate, aberațiile prezente în fasciculul considerat, factorul Strehl (definit ca raportul dintre intensitatea fasciculului real și intensitatea unui fascicul ideal), valoarea Peak to Valley (PtV) în lungimi de undă și calculează imaginea fasciculului focalizat.



a)



b)



c)

Fig.5. a) Distribuțiile de fază și de intensitate ale fascicului emis de dioda laser; b) Aberrațiile prezente în fascicul; c) Focusul fascicului calculat de software

Senzorul indică $PtV = 1.646$ și un factor Strehl de 0.88. Aceste valori relativ bune se datorează faptului că fasciculul emis de dioda laser a fost filtrat spațial.

Pentru a corecta, folosind optică adaptivă, frontul de undă al laserului de 1 PW, înainte ca acesta să interacționeze cu ținta, în camera de interacție a fost instalată o oglindă deformabilă (Fig.6).

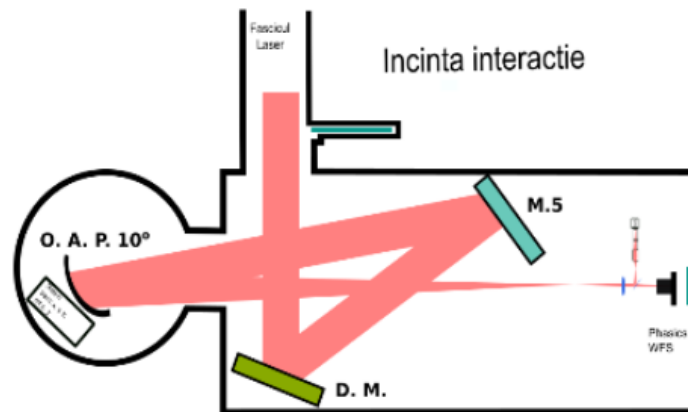


Fig.6. Schema incintei de interacție unde a fost instalat sistemul de optică adaptivă

Utilizarea sistemului de optică adaptivă în regim de buclă închisă presupune obținerea imaginii oglinzii deformabile pe senzorul de front de undă. Pentru aceasta, s-au calculat parametrii unui sistem telescopic folosind formalismul matriceal ABCD. Parametrii de intrare au fost distanța de la oglinda deformabilă la oglinda parabolică $do = 4500$ mm, distanța focală a oglinzii parabolice $f1 = 3200$ mm, distanța de la oglinda parabolică la lentilă $d1 = 3750$ mm. Fasciculul laser trebuia adus de la dimensiunea de 160 mm la un diametru potrivit pentru a putea fi vizualizat în întregime pe senzor. S-au investigat diferite configurații, în programul Mathematica, pentru distanța focală a lentilei și pozițiile acestuia față de oglinda parabolică pentru a obține o dimensiune corespunzătoare a imaginii, aflată la o distanță ce se încadrează în limita de spațiu a incintei. Matricea de transfer a sistemului este:

$$M = \begin{pmatrix} 1 & d_i \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d_o \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

În ecuația de mai sus, pentru o lentilă cu distanța focală cunoscută, necunoscuta este distanța de la lentilă la imagine, d_i . După efectuarea calculului, se obține o matrice de forma

$$M = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$$

Pentru aflarea distanței d_i se impune condiția de formare a imaginii, aceasta fiind anularea elementului B din matricea M. Luând în calcul o lentilă cu distanța focală $f_2 = 120$ mm, am obținut $d_i = 147$ mm. În urma înmulțirii dintre diametrul inițial al fasciculului de 160 mm cu magnificarea sistemului considerat (magnificarea este dată de elementul A al matricei M) s-a obținut o dimensiune a imaginii de aproximativ 8 mm.

Folosind acest montaj s-a măsurat frontul de undă laser înainte de operarea sistemului de optică adaptivă în buclă închisă (Fig.7.a). După efectuarea corecției, factorul Strehl a crescut de la 0.26 la valoarea de 0.7 (Fig.7.b).

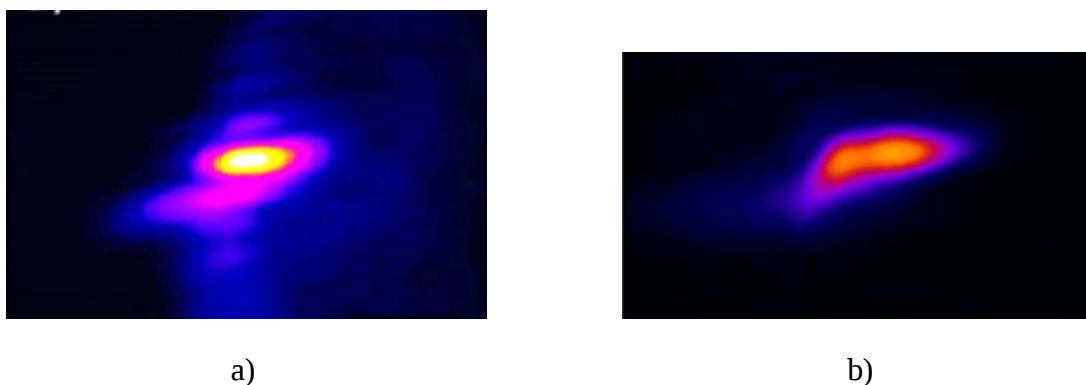


Fig.7. Imaginea fasciculului focalizat obținută pe microscop a) înainte de efectuarea buclei cu optică adaptivă, ce prezintă un factor Strehl 0.26, b) după corectarea frontului de undă cu optică adaptivă, cu factor Strehl 0.7

În Fig.7.b) se observă ca focusul laser încă prezintă aberații ce nu au putut fi corectate cu optica adaptivă. Aceste aberații sunt aberații cromatice, care pentru a fi înlăturate este necesară re poziționarea elementelor optice din compresorul temporal.

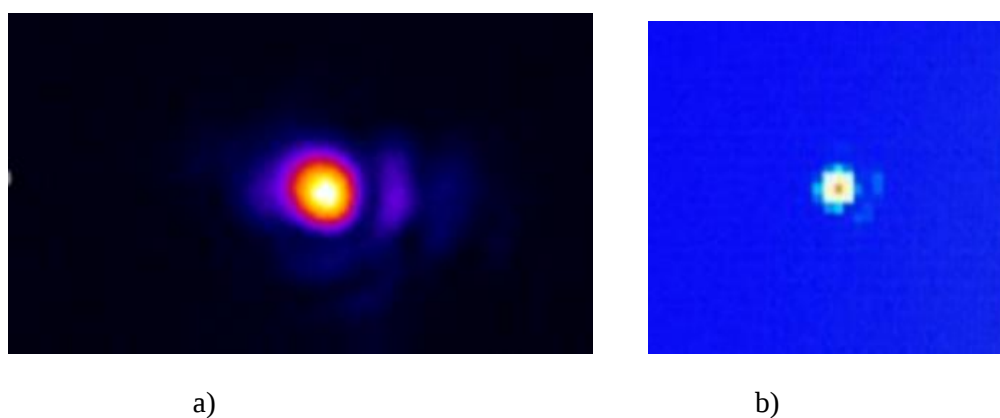


Fig.8. a) Fasciculul laser focalizat după îndepărtarea aberațiilor de cromaticitate, b) Spotul focal calculat cu senzorul de front de undă

Concluzii

S-a utilizat senzorul de front de undă pentru caracterizarea spațială a unui fascicul de aliniere. Pentru eliminarea aberațiilor prezente în fasciculul laser de 1 PW de la CETAL, a fost implementat în camera de interacție un sistem de optică adaptivă.

În urma optimizării frontului de undă laser s-a obținut un factor Strehl de 0.7 și dimensiunea spotului focal de 60 μm . După operarea sistemului de optică adaptivă, imaginea focusului laser pe camera senzorului prezenta aberații ce nu au putut fi compensate. Acestea erau aberații de cromaticitate, ce au fost înlăturate prin alinierea rețelelor de difracție din compresor.

Bibliografie

- [1] R. Dabu, *Lumina Extremă, Lasere de Mare Putere*, 2015
- [2] S. Ranc, G. Chériaux, S. Ferré, J.-P. Rousseau, J.-P. Chambaret, *Importance of spatial quality of intense femtosecond pulses*
- [3] <http://opticspy.org/>
- [4] <https://www.edmundoptics.com/resources/application-notes/optics/introduction-to-adaptive-optics-and-deformable-mirrors/>

Facultatea de Științe Aplicate, *Universitatea POLITEHNICA București*

Quantum random number generation with down converted photon pairs

Student,

Laurențiu – Vasile DOSAN

Prof. coordonator,

Mona MIHĂILESCU

Lupeni, 2020

Quantum random number generation with down converted photon pairs

Vasile-Laurențiu DOSAN ¹⁾

¹⁾ *Faculty of Applied Sciences, University Politehnica of Bucharest, Bucharest, Romania*

Keywords: physical random number, quantum random number generation, coincidence rate, entangled photons, entropy, extractor.

INTRODUCTION

Random numbers are an essential resource in science and engineering with important applications, especially in cryptography, scientific simulations, gambling and lotteries. There are two types of random number generators: (i) *pseudo-random number generators* (PRNGs), based on mathematical algorithms which approximate the behavior of randomness and (ii) *true-random number generators* (TRNGs), which use the behavior of a physical process. Quantum physics can be exploited to generate true random numbers: a system can be prepared in a superposition of the basis states. The measurement outcome of a quantum state can be intrinsically random¹.

In the last few years there has been a large number of proposals, experiments, improvements and theoretical results in randomness certifications of quantum random number generators (QRNGs). In some critical cases, as Bell's tests and cryptography, the random numbers are required to be both private and to be provided at an ultra-fast rate. True random number generators are usually considered trusted, but their security can be compromised in the case of imperfections or malicious external actions².

1. BLOCK DESCRIPTION

A typical physical random number generator is divided into separate blocks with well-defined subtasks (FIG. 1)³.

- (i) Block 1 – *entropy source* – contains a physical system for generation the raw bits and a measurement system. The physical system represent a source of randomness. The measurement system collect the data from the physical system and prepare them for postprocessing step.
- (ii) Block 2 - *postprocessing* - this step aims to transform the raw-bits into a good-quality sequence. The most significant part of this procedure is randomness extraction.

In this approach, our entropy source is a quED⁴ photon source which produces correlated and polarization entangled photon pairs. In order to obtain the raw-bits, we converted the coincidence rates from decimal to binary. In the postprocessing step, we applied different methods to extract a close-to-uniform random sequence.

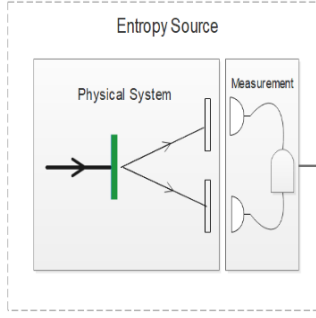


FIG. 1. Block diagram of a typical physical random generator.

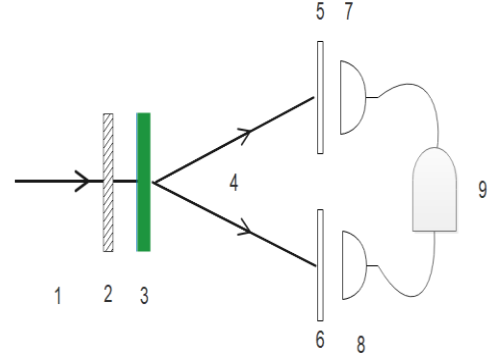


FIG.2. The entropy source: 1. pump laser (405 nm), 2. HWP 3. BBO crystal, 4. photon pairs (810 nm), 5. & 6. polarizers, 7. & 8. filters with optical fibres, 9. control and analysis module with APD detectors.

2. ENTROPY SOURCE

In our experiments we used the quTools module (quED) (FIG.2) which consists of: (1) a 405nm pump laser; (2) a half-wave plate for pumping the crystals at 45°; (3) two orthogonally-mounted BBO crystals for type-I SPDC; (5,6) polarizers and filters before the (7,8) avalanche photodiode detectors (APD) and (9) a control module⁴.

The Spontaneous parametric with down conversion (SPDC) process occurs when the laser beam of frequency ω_p pumps the beta-barium borate (BBO) nonlinear crystal, generating correlated pairs of signal and idler photons due to the conservation of energy and wave-vector momentum⁵:

$$\omega_p = \omega_s + \omega_i \quad k_p = k_s + k_i$$

Here ω_s and ω_i are the signal and idler frequencies, k_p , k_s , k_i are the pump, signal and idler wave vectors. If we put a half wave-plate (HWP) before the BBO crystal we obtain the singlet state:

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|HH\rangle + |VV\rangle),$$

Where H and V corresponds with the horizontal and vertical polarization of the photons. For the characterization of the quED entangled photons source we tested Bell-CHSH violation and we computed the entanglement visibility.

2.1. Bell-CHSH inequality

Entanglement is a quintessential quantum property. Entangled states have quantum correlations stronger than any classical correlations. Consequently, entanglement is an important resource for quantum technologies (teleportation, sensing, communication etc). A sufficient (but not necessary) condition for a quantum state to be entangled is to violate Bell-CHSH inequality^{6,7}. A classical system always satisfies Bell-CHSH inequality $S \leq 2$,

where the Bell parameter S can be calculated from the state of the system. However, for a quantum system this inequality is violated: there are quantum states with $2 < S \leq 2\sqrt{2}$.

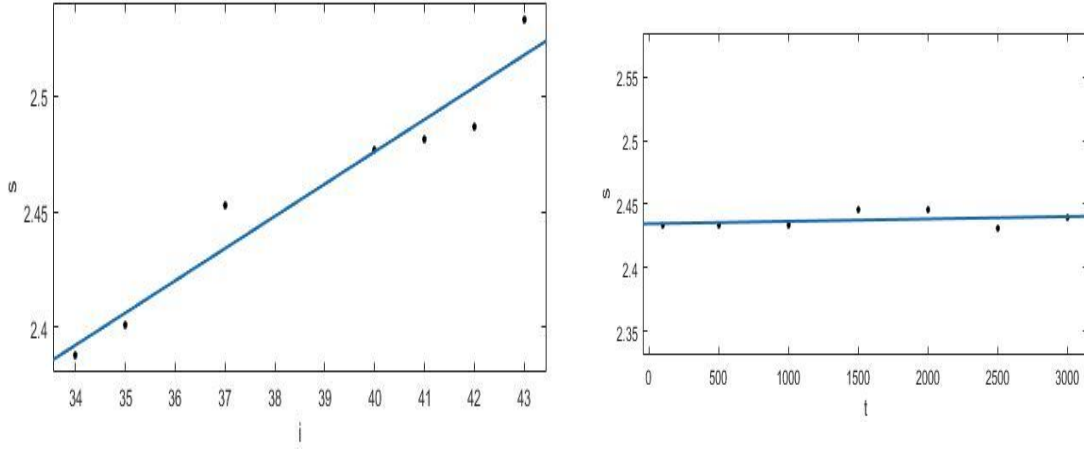


FIG.3. (left) The dependence of the S value on the output power of the laser diode : S increases with the increase of laser beam intensity; (right) The dependence of the S value on the integration time : S does not depends on integration time

To determine the Bell parameter S we measure coincidence rates $\{N_1, \dots, N_{16}\}$ for 16 different settings (angles) of the two polarizers. These values are recorded by the quED interface and the S value and the standard deviation are automatically displayed. For the maximal total violation setting, we obtained $S=2.41$ ($S>2$). We repeat this procedure for different source parameters: laser current, integration time, polarizers angles (see FIG. 3). If we remove the half-wave plate before the BBO crystal, the generated photons are no longer entangled and they satisfy Bell-CHSH inequality, $S \leq 2$.

2.2. Entanglement visibility

Another simplest test to verify entanglement of photons in the quED involves a measurement of correlation curves in two non-orthogonal complementary bases. This is accomplished by fixing the orientation α of one polarizing filter and changing the orientation β of the other. Settings $\alpha = 0^\circ$ is chosen for the measurement horizontal/vertical polarization basis and $\alpha = 45^\circ$ for the diagonal basis. The recorded coincidence count rates for the two settings show the $\sin^2(\beta - \alpha)$ dependencies in analogy to the Malus' law. To quantify the quality of the polarization correlations, the visibility V of measured curves can be directly estimated from the formula:

$$V = \frac{C_{\max} - C_{\min}}{C_{\max} + C_{\min}}$$

where $C_{\max}/C_{\min}$ is the maximum/minimum coincidence count rate⁴. We obtain a decent entanglement visibility: $V_{H/V} = 98\%$, $V_{+/-} = 72\%$.

2.3. Poisson statistics

Poisson statistics are the discrete equivalent of the Gaussian statistics that generate normal distribution. Poisson statistics apply to random variables where the results can only occur in positive integer values [8]. We test if our system exhibit Poisson statistics: the

coincidence count rate of the correlated photons per unit time (integration time) registered by APD detectors. In a Poisson distribution the probability $P(n)$ for observing n events is given by:

$$P(n) = \frac{\mu^n}{n!} e^{-\mu}$$

where μ is a constant. We did goodness of fit statistical tests⁹ in order to check if the coincidence count rates follow a Poisson distribution.

The statistical test is designed to compute a p-value. The null hypothesis is accepted if p-value ≥ 0.01 (in this case, null hypothesis: the random variables follows a Poisson distribution). We use a confidence level of 99%.

Pol.1 (deg)	Pol.2 (deg.)	p-value (with HWP)	p-value (without HWP)
0	0	0.1602	0.9173
0	22.5	0.2523	0.5089
0	45	0.0026	0.6111
0	90	0.3927	0.2354
0	135	0.0202	0.4374
22.5	45	0.7322	0.5961
45	90	0.3701	0.5097
45	135	0.4126	0.2461
90	90	0.4126	0.2833
90	135	0.0861	0.2982
135	135	0.3675	0.6369

Table 1. The study of Poisson distribution for different angles of the polarizers.

We computed p-values for different positions of the polarizers (Table 1). We observed that for both settings – with and without HWP – coincidence rates follow a Poisson distribution. In the following work, we will concentrate on the data collected at (0,0) position.

3. ENTROPY ESTIMATION

Entropy offers a convenient way to measure randomness. The different entropies give a mathematical measure for how unexpected a value is. We express entropy in bits, in the information theory sense, which is closely related to the concept of thermodynamic entropy but takes it to a more natural formulation for information processing and communications³.

The Shannon entropy¹⁰ gives the average number of bits of information we can extract from a single outcome. A higher Shannon entropy means we have a distribution closer to uniform and that we can extract more random bits from the process. The Shannon entropy of a random variable X is defined as

$$H(X) = - \sum_{x \in A} P_X(x) \log_2 P_X(x)$$

where $P_X(x)$ is the probability of getting the outcome x from a discrete set A with N values. After converting the coincidence rates of photons, we computed the Shannon entropy of the raw bits using R software dedicated to statistical analysis. We obtained $H = 3.8286$ for

entangled photons and $H = 2.8903$ for correlated photons. This means that we can extract more bits from a single outcome using the setting that generates entangled photons.

4. POSTPROCESSING

The main target of the postprocessing step is to convert the raw bit sequence into a good-quality output as close as possible to a uniform bit distribution. The main purpose of postprocessing is randomness extraction. Randomness extractors are functions that transform the raw sequences into a uniform random sequence at the output with most of the randomness available in the input. Some TRNG's are designed to produce raw sequences with negligible bias and forgo the postprocessing phase³. In our experiment, we compared two methods to extract the random sequence: slow-clock method and von Neumann extractor.

(i) von Neumann extractor

von Neumann proposed a simple method in which, for every pair of generation bits, we discard the results 00 and 11 and transform 10 to 1 and 01 to 0¹¹. The extractor may be applied to any input containing an even number of bits (x). x is first split into $x/2$ bits pairs after which extraction is applied to each pair. For example, the input $x = 00110110$ is split into bit pairs 00|11|01|10, resulting the sequence 01 from the third and the fourth pair¹².

(ii) Slow-clock method

A second method is to use a slow clock¹³. We set a constant integration ($t = 0.1$ s) time and we measure the coincidence rates. In order to extract the random sequence, we convert an even number of coincidence/integration time into a bit with value 0 and an odd coincidence rate into a 1. In other words, we apply a modulo 2 on coincidence rates.

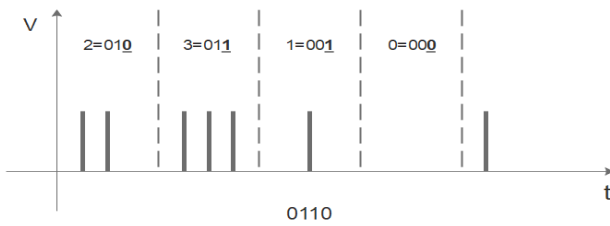


FIG.4. Slow-clock method: The integration time is constant, generating random number that equals the number of detections during the period.

5. RANDOMNESS TESTING

The randomness of a sequence of numbers can be extensively tested, though not proven¹⁴. There is no way to detect that a sequence is really random, but there are methods to detect suspicious sequences. The only way to approach to randomness testing is using a statistical test. The main suit to perform these statistical tests is NIST¹⁵. We performed some of the most relevant tests.

- (1) *Frequency test* – calculates the proportion between ones and zeros and how close is that proportion to $\frac{1}{2}$.
- (2) *Runs test* – checks if the numbers of runs in a string corresponds to that in a random sequence and if the oscillations between zeroes and ones is too fast or too slow.
- (3) *Spectral test* – detect periodic features in the sequence.
- (4) *Maurer's universal test* – detects whether the sequence can be compressed without loss of information¹⁶.

These tests are useful to detect faulty generators but cannot prove a generator produces truly random outputs. Deterministic random number generators, like the Mersane Twister pseudo-random number generator, can pass the tests but are predictable.

The results from Table 2 are obtained by using rand.test package in R software. The tested data are obtained from the randomness extraction using the two methods mentioned above: vN extractor and slow-clock method.

METHOD	SLOW-CLOCK	VN	SLOW-CLOCK	VN
TEST	(ENTANGLED	EXTRACTOR	(CORRELATED	EXTRACTOR
	PHOTONS)	(ENTANGLED	PHOTONS)	(CORRELATED
		PHOTONS)		PHOTONS)
FREQUENCY	0.5271	0.6698	0.2059	0.0577
RUNS	0.3993	0.3567	0.3261	0.3567
SPECTRAL	0.2866	0.3011	0.3801	0.2367
MAURER	0.9799	0.1387	0.6779	0.4157

Table 2. The results (p-values) on randomness testing.

6. CONCLUSION

In this paper, we have introduced a method of generating random bits using coincidence rates of correlated photon pairs. We have made a comparison between implementation of the device using HWP before the BBO crystal (entangled photons) and the implementation which does not contain HWP (correlated photons). Computing p-values for testing the statistics of correlated/entangled photons we observed that for both settings, the data follows a Poisson distribution. We can observe that entanglement has a significant contribution on the quality of the final output. Following the entire procedure mentioned above (producing the raw bits by measuring the coincidence rates, applying the randomness extraction and testing the randomness), we generated 22 quality bits/second using the setting with entangled photons while in the another setting we generated a random sequence of 10 bits/second.

REFERENCES

- [1] Ma et al., “Quantum random number generation”, npj Quantum Information 2, 16021 (2016).

- [2] Avesani et al., “Source-device-independent heterodyne-based quantum random number generator at 17 Gbps”, *Nature Communications*, 9:5365 (2018).
- [3] Collantes, M. H., “Quantum random number generators”, *Rev. of Modern Physics* 89, 015004 (2017).
- [4] quED, A Science Kit for Quantum Physics, <https://www.qutools.com/qued/>
- [5] Ma et al., “A random number generator based on quantum entangled photon pairs”, *Chin.Phys.Lett.* 10, 1961 (2004)
- [6] Clauser et al., “Proposed Experiment to Test Local Hidden-Variable Theories”, *Phys.Rev.Lett.* 24, 549 (1970).
- [7] Aspect et al., “Experimental tests of realistic local theories via Bell’s theorem”, *Phys.Rev.Lett.* 7, 47 (1981).
- [8] Fox,M., [Quantum Optics – An introduction], Oxford University Press, New York, 321 (2006).
- [9] Cowan,G., [Statistical data analysis], Oxford University Press, New York, 103-106 (1998).
- [10] Shannon,C.E., ”A mathematical theory of communication”, *The Bell System’s Technical Journal* 27, 379-423 (1948).
- [11] von Neumann, J., “Various techniques used in connection with random digits”, *Design of computers, theory of automata and numerical analysis*, 5 (1951).
- [12] Seepers et al., “On Using a Von Neumann Extractor in Heart-Beat-Based Security”, *Proc. IEEE* 411, 491-498 (2015).
- [13] Schmidt, H.,”Quantum mechanical random number generator”, *J.Appl.Phys.* 41 (1970).
- [14] Stefanov et al., “Optical quantum random generator”, *J.Mod.Opt.* 4 (2000).
- [15] Rukhin et al.,”A statistical test suite for random and pseudorandom number generators for cryptographic applications”, *NIST spec.publ.*, 800-22 (2010).
- [16] Maurer, U., “A universal statistical test for random bit generators”,*J.Cryptol.* 5 (1992)



ANALIZA FRACTALĂ A IMAGINILOR NEURONALE PRIN METODA BOX-COUNTING

Matișan Răzvan-Andrei¹, Minea Radu-Ștefan²

Anul I, Facultatea de Automatică și Calculatoare, Universitatea POLITEHNICA din București

ABSTRACT

Lucrarea de față explorează analiza complexităților structurilor neuronale, folosind metoda box-counting. Această metodă determină gradul de complexitate al structurilor prin încadrarea acestora în pătrate ("boxes") din ce în ce mai mici. Astfel, cu cât o structură este mai complexă, cu atât va fi încadrată în pătrate de dimensiune mai mică. Metoda box-counting are la bază analiza fractală, concept dezvoltat de matematicianul Benoit Mandelbrot, ce a observat că unele structuri, precum fulgii de zăpadă, se repetă la infinit, șabloanele repetându-se la dimensiuni din în ce în ce mai mici odată cu fiecare "iterație".

INTRODUCERE

Analiza fractală

Analiza fractală constituie o metodă matematică modernă prin care se poate măsura gradul de complexitate al elementelor din natură [1, 3]. La bazele analizei fractale stă geometria fractală [4], al cărei parametru este dimensiunea fractală (DF) a obiectelor analizate [7]

În analiza fractală, există diferite metode pentru a calcula dimensiunea fractală a obiectelor dintr-un plan, toate bazându-se fie pe lungimea, fie pe masa obiectului [5]. Deoarece metodele tradiționale necesită, de regulă, mult timp, nevoia de a folosi alte tehnici a crescut. Una dintre ele este metoda tradițională de box-counting ("BC Method") ce se bazează pe conceptul de "acoperire" a imaginii cu pătrate, ce poartă denumirea de "boxes". Deși metoda nu este potrivită pentru a calcula lungimi sau orice alte caracteristici ale formelor, este cea mai bună tehnică de calcul a DF. Din acest motiv, metoda de BC este folosită des alături de alte tehnici în analiza fractală [7, 11, 12].

Astfel, DF are numeroare aplicații în diverse zone de cercetare. În particular, analiza fractală este adesea utilizată în medicină [4, 6]. În cazul imaginilor neuronale, acest parametru ajută în a cuantifica:

- 1) Complexitatea membranei neuronale [5 - 7]
- 2) Spațiul acoperit de dendritele neuronului [7]

Scopul lucrării

De aceea, scopul lucrării este de a explora aplicațiile analizei fractale în medicină, în particular în determinarea complexității structurilor neuronale.

¹ Facultatea de Automatică și Calculatoare, anul I, razvan.matisan@stud.acs.upb.ro

² Facultatea de Automatică și Calculatoare, anul I, radu_stefan.minea@stud.acs.upb.ro

TEORIE ȘI METODE

Procesarea imaginilor

Imaginile au fost prelucrate folosind software-ul public Image J, dezvoltat de Institutul Național de Sănătate al SUA. În imaginile preluate, axonii și coloana neuronilor au fost scoase anterior din imagine, iar dendritele au fost umplute cu pixeli. Ulterior, metoda box-counting a fost aplicată asupra imaginilor prelucrate folosind același software.

Metoda Box-counting

Box-counting este o metodă de culegere a datelor pentru analiza tiparelor complexe prin spargerea unui set de date, a unui obiect, a imaginii etc. în bucăți mai mici și mai mici, de obicei în formă de "cutie" (box), și analizarea pieselor la fiecare scară mai mică. Esența procesului a fost comparată cu mărirea sau micșorarea prin metode optice sau computerizate pentru a examina modul în care se schimbă observațiile detaliilor cu scala. Totuși, în contabilizarea cutiilor, în loc să se modifice mărirea sau rezoluția unui obiectiv, investigatorul modifică mărirea elementului folosit pentru a inspecta obiectul sau modelul. Algoritmi de numărare a cutiilor au fost aplicate modelelor din spațiile 1-, 2- și 3-dimensionale. Tehnica este de obicei implementată în software pentru utilizarea pe modele extrase din medii digitale, deși metoda fundamentală poate fi utilizată pentru a investiga fizic anumite modele. Tehnica a apărut și este utilizată în analiza fractală și are aplicații în domenii conexe, cum ar fi analiza multifractală. [6]

În ceea ce privește aplicarea metodei, fiecare mulțime de pătrate este caracterizată de lungimea r a laturii pătratului. Numărul corespunzător de pătrate necesar pentru a acoperi întregul contur este reprezentat ca o funcție de r - $N(r)$. Dimensiunea fractală D se determină din panta S a dependenței de tip logaritmic dintre $N(r)$ și r , unde:

$$D = -S$$

Rezultatul de mai sus se poate observa și în figura A.2.

În aplicarea metodei de box-counting, dimensiunea pătratelor este de la 2 până la 128 pixeli.

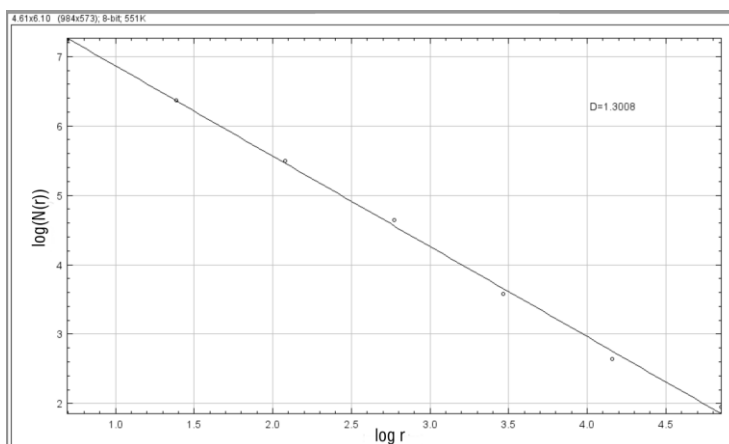
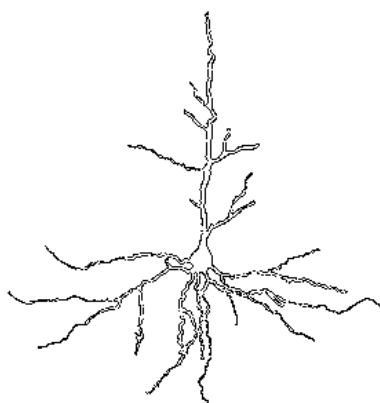


Fig. A.1- imagine procesată a unui neuron (variantea neprocesată, preluată din [9])

Fig. A.2 - reprezentarea grafică a sistemului log-log



Nume Fig.	C2	C4	C8	C16	C32	C64	C128	D
A	1389	585	243	104	36	14	7	1.301

Tab. 1 – Valorile de pe grafic: numărul de "box-uri" de dimensiune 2, 4, 8 ... 128

Dimensiunile pătratelor sunt scalate ca o putere a lui 2 - 2, 2² ... 2⁷. Acest șir reprezintă o progresie geometrică finită cu rație pozitivă, supraunitară, pe care o vom nota cu (r_n) , $n \geq 1$. Motivul pentru care se obține o progresie geometrică strict crescătoare este pentru că modelele/șabloanele fractale sunt generate de diferite reguli recursive.

Prin definiție:

$$\frac{r_{n+1}}{r_n} = q, \text{ oricare ar fi } n \in \mathbb{N}; \text{ unde } q = \text{rația progresiei}$$

Logaritmând expresia, obținem:

$$\log(r_{n+1}) - \log(r_n) = \log(q) \quad (3)$$

Ceea ce înseamnă că valorile de pe axa r a sistemului log-log formează o progresie aritmetică (șir de valori echidistante). De aceea, punctele reprezentate pe grafic sunt egal departate unele de celelalte (Fig. B).

De asemenea, evaluarea statistică a coeficientului de corelație liniară R (aproximativ 0.996) a dreptei cele mai apropiate de cele 7 puncte demonstrează faptul că punctele reprezentate pe grafic sunt foarte aproape de a forma o dreaptă.

REZULTATE

Folosind metoda box-counting am analizat două imagini (Fig. B, fig. C preluate din [8]) ale neuronului, cu scopul de a cuantifica morfologia neuronului, având în vedere șabloanele de ramificare ale dendritelor neuronului, dar mai ales în funcție de forma dendritelor și de capacitatea lor de acoperire a spațiului.

Am ales aceste două imagini cu scopul de a dovedi că structurile mai complexe atrag după sine dimensiuni fractale mai ridicate.

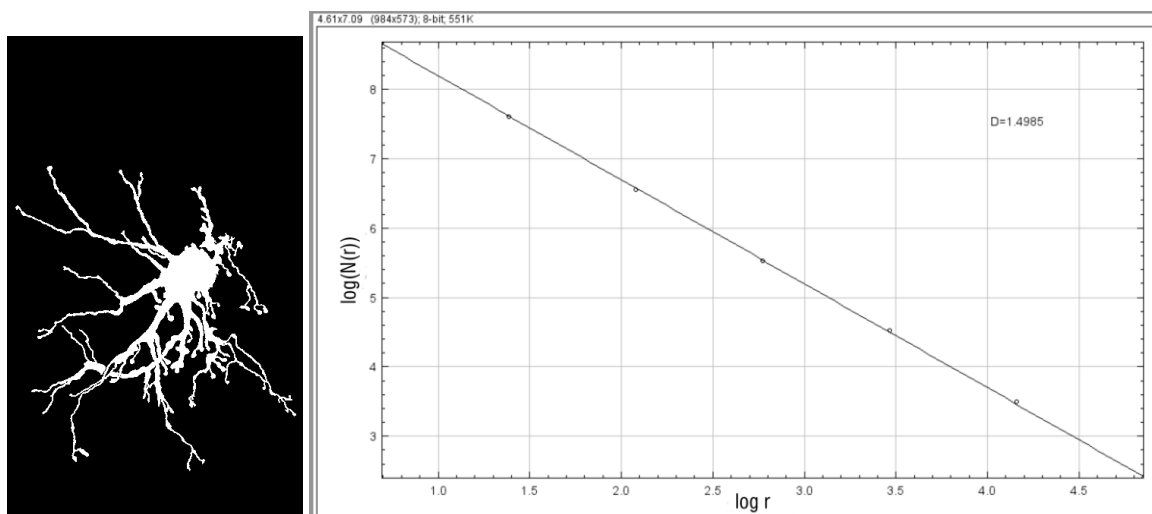


Fig. B.1 și Fig. B.2: graficul rezultatelor obținute

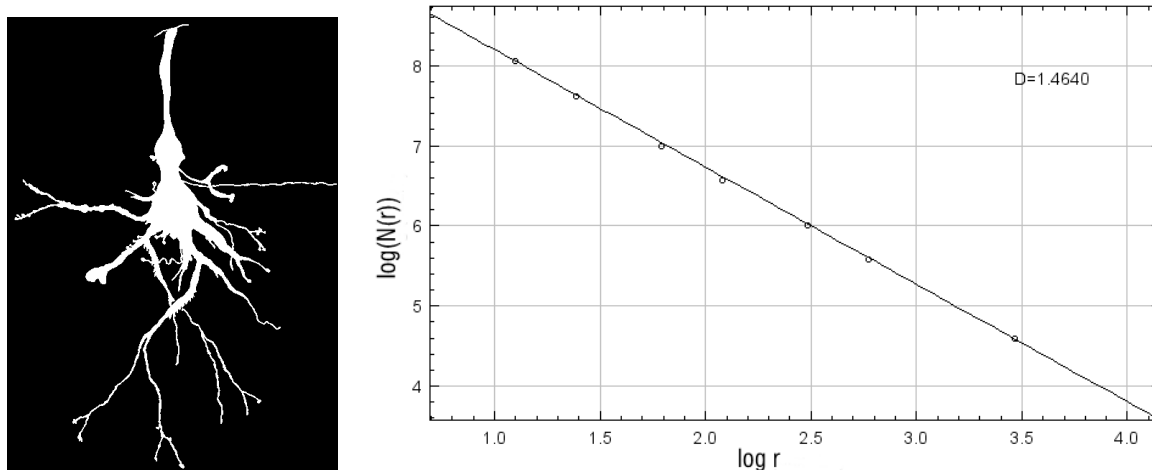


Fig. C.1 și Fig. C.2: graficul rezultatelor obținute

În urma interpretării reprezentării grafice a datelor, obținem dimensiunile fractale ale celor două imagini neuronale:

Imagine	DF
B	1,4985
C	1,4640

Tab. 2: Dimensiunile fractale obținute

Astfel, prin asocierea dimensiunii fractale obținute cu o analiză vizuală a celor două imagini, constatăm că neuronul B are o structură mai complexă decât neuronul C, întrucât $DF(B) > DF(C)$. Diferența dintre cele două dimensiuni fractale nu este mare (aproximativ 0,03) însă putem observa cum neuronul C are un număr mult mai mic de ramificații decât B.



Sesiunea de comunicări științifice
studentești, ediția 2020

Departamentul de Fizică

Universitatea Politehnica din București

Așadar, tragem concluzia că arborele dendritic al neuronului prezintă proprietățile unui fractal – dimensiunea unui arbore simplu, necomplicat, rar este mai mică decât cea a unui arbore dendritic complex, cu un număr mare de ramificații. În concluzie, întotdeauna o structură mai complexă va fi echivalentă cu o dimensiune fractală mai mare.

CONCLUZIE

Această lucrare demonstrează că analiza fractală, concretizată prin metoda box-counting, constituie o unealtă potrivită de analiză a morfologiei structurii dendritice a imaginilor neuronale 2D. Prin determinarea dimensiunii fractale, se poate obține complexitatea structurii oricărui obiect din natură.



BIBLIOGRAFIE

Surse principale:

[1] Nemanja Rajković, Bojana Krstonošić, și Nebojša Milošević, "Box-Counting Method of 2D Neuronal Image: Method Modification and Quantitative Analysis Demonstrated on Images from the Monkey și Human Brain"

[2] N.T. Milosevic și D. Ristanovic, "The box-counting method as an efficient tool for 2D fractal analysis of neuronal dendritic arbor"

Surse secundare:

[3] B. B. Mandelbrot, "The Fractal Geometry of Nature", W.H. Freeman, New York, NY, USA, 1982

[4] E. Fernandez și H. F. Jelinek, "Use of fractal theory in neuroscience: methods, advantages, and potential problems," *Methods*, vol. 24, no. 4, pp. 309–321, 2001

[5] T. G. Smith Jr., G. D. Lange, și W. B. Marks, "Fractal methods și results in cellular morphology - dimensions, lacunarity and multifractals", *Journal of Neuroscience Methods*, vol. 69, no. 2, pp. 123–136, 1996

[6] A. Di Ieva, F. J. Esteban, F. Grizzi, W. Klonowski, și M. Martin-Landrove, "Fractals in the neurosciences, part II: clinical applications and future perspectives," *Neuroscientist*, vol. 21, no. 1, pp. 30–43, 2015

[7] N. T. Milosevic, "Fractal analysis of two-dimensional images: parameters of the space-filling and shape," in *Proceedings of the 20th International Conference on Control Systems and Computer Science*, Vol. 2: IAFA: Fractal Analysis of Medical Images. Los Alamitos: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, I. Dumitrache, A. Magda Florea, F. Pop, și A. Dumitrascu, Eds., pp. 539–544, 2015

[8] Valeria Isaeva, Yuriy Karentin, "The Quasi-Fractal Structure of Fish Brain Neurons", *Russian Journal of Marine Biology*, Martie 2004

[9] Mihai-Virgil NICHITA, Maria-Alexandra PĂUN, Vladimir-Alexandru PĂUN și Viorel-Puiu PĂUN, "Fractal analysis of brain glial cells. Fractal dimension and lacunarity", *U.P.B. Sci. Bull., Series A*, Vol. 81, Iss. 1, 2019

[10] Ivan Zaletel, Nela Puskas, "Fractal analysis in neuroanatomy and neurohistology", Decembrie 2016

[11] E. Fernandez și H. F. Jelinek, "Use of fractal theory in neuroscience: methods, advantages, and potential problems," *Methods*, vol. 24, no. 4, pp. 309–321, 2001.

[12] A. Di Ieva, F. J. Esteban, F. Grizzi, W. Klonowski, și M. Martin-Landrove, "Fractals in the neurosciences, part II: clinical applications and future perspectives," *Neuroscientist*, vol. 21, no. 1, pp. 30–43, 2015.

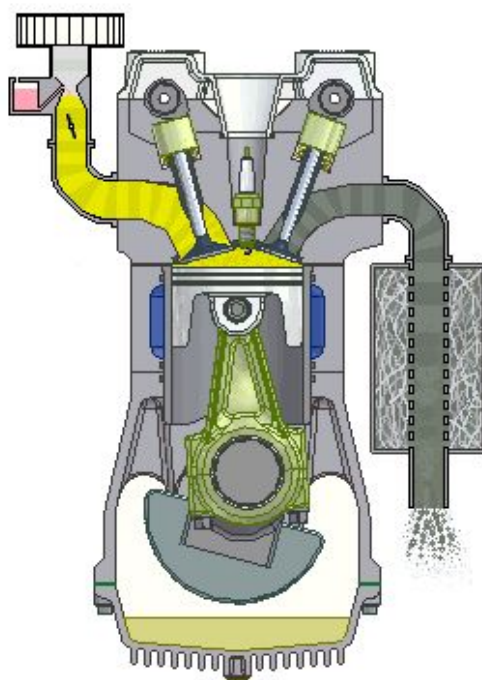
MONITORIZAREA GAZELOR EMISE DE UN AUTOTURISM CU APRINDERE PRIN SCÂNTEIE FOLOSIND ANALIZORUL MULTIFUNCȚIONAL

Monea Ana Maria

Anul IV, Facultatea de Științe Aplicate, Universitatea Politehnica din București

În această lucrare se prezintă 2 modalități de monitorizare a gazelor emise de un autoturism cu aprindere prin scânteie folosind un analizor multifuncțional.

Autoturismul utilizat pentru măsurători are un motor pe benzină în 4 timpi și cu 4 pistoane.



Schema de funcționare a motorului este simplă, așadar primul timp constă în admisia combustibilului cu aer în camera de ardere, prin deschiderea valvei de admisie. Timpul 2 constă în compresia combustibilului în camera de ardere, atunci când pistonul ajunge în punctul mort. Timpul 3 este reprezentat de arderea combustibilului prin scânteierea bujiei. Acest proces conduce la o explozie, care obligă pistonul să coboare, umplând camera de ardere cu gaz ars. Ultimul timp este dat de evacuarea gazului ars anterior în camera de evacuare prin deschiderea valvei de evacuare. Gazul ajunge în catalizatorul care minimizează cantitatea de gaze toxice și le trimite mai departe către țeava de eșapament.

Analizoarele de gaze multifuncționale au această denumire din simplul fapt că printr-o simplă setare se pot transforma din analizoare cu 4 gaze, în opacimetre. Acest tip de analizor este revoluționar în industria auto deoarece este mult mai practic și mai ușor de utilizat.

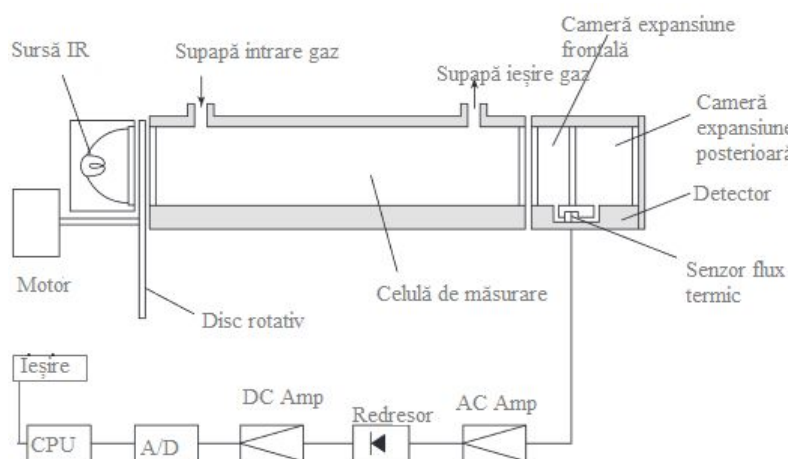
Analizorul de gaze multifuncțional AVL 4000 utilizat la aceste măsurări este produs de compania AVL List GmbH și folosit la măsurarea concentrațiilor de poluanți din gazele de eșapament emise de autovehiculele cu motoare pe benzină sau diesel. Acest tip de analizor este complex și reprezintă o variantă nouă a analizoarelor de gaze care se întâlnesc frecvent în punctele de Inspecție Tehnică Periodică. Accesul la un astfel de dispozitiv a fost asigurat prin bunăvoința Laboratorului de metrologie Metro Profesional Test.

Acest analizor multifuncțional este ușor de utilizat deoarece se conectează prin Bluetooth la o interfață OBD (On Board Diagnostics) care la rândul ei este conectată la calculatorul mașinii atunci când se fac măsurări. OBD-ul transmite informații analizorului legate de turație sau temperatura motorului. Meniul bine structurat al analizorului provoacă o măsurare mai eficientă și mai rapidă, rezultând un maxim de informații care concluzionează dacă motorul mașinii emite concentrații de poluanți sub standardul admis. Pentru o măsurare corectă se introduce sonda de prelevare de gaze a analizorului în țeava de eșapament pe o distanță de 30 cm.

Pentru măsurări ale poluanților din gazele emise de motoarele pe benzină, se folosesc senzori de O_2 , CO_2 , HC și NO_2 . Aceștia se schimbă anual, în funcție de numărul de testări efectuate. Pe lângă acești senzori, se mai găsește și o sursă cu infraroșu care ajută la detectarea poluanților.

Principiul de funcționare al analizorului de gaze de ardere, unde radiațiile luminoase de la o sursă în infraroșu sunt întrerupte de un disc rotativ la o frecvență specifică și care ulterior ajung într-o celulă de măsurare. Gazul eșantion ajunge prin supapa de intrare în celula de măsurare și se intersectează cu razele infraroșii din care este absorbită energie. Detectorul unde ajunge energia e format din 2 camere de expansiune, una frontală și una posterioară, ele fiind separate de un spațiu îngust, în mijlocul căreia se află senzorul de flux termic. O anumită cantitate de energie este absorbită de camera de expansiune frontală, iar restul de energie este absorbită automat de camera de expansiune posterioară. Acest lucru determină o creștere a presiunii în ambele camere. Diferența de presiune dintre cele două camere determină un debit mic în spațiul îngust dintre acestea, el fiind detectat de senzorul de flux termic și convertit într-un semnal analogic.. Semnalul este amplificat, iar cu ajutorul unui convertor analog digital este transformat în semnal digital. Acesta este procesat, împreună

cu un semnal sincron venit de la discul rotativ, pentru a furniza un semnal de ieșire proporțional cu concentrația gazului de interes.



Procedura de măsurare a analizorului respectă mai mulți pași.

Pasul 1. Se pornește analizorul de gaze și se așteaptă revenirea acestuia la meniul principal.

Pasul 2. Se introduc valorile caracteristicilor de bază ale autoturismului care urmează a fi măsurat: număr de înmatriculare, număr kilometri parcurși, motorizare și tipul combustibilului.

Pasul 3. Se setează tipul de măsurare dorit: standard, oficială sau diagnoză. Pentru realizarea celor 2 teste se utilizează măsurarea oficială deoarece calculează reziduurile de hidrocarburi din furtunul sondei de prelevare, cât și din circuitul analizorului.

Pasul 4. Analizorul se conectează la calculatorul mașinii printr-un OBD. Acesta este un microsenzor care transmite și salvează datele mașinii în timpul procesului de măsurare.

Pasul 5. Se pornește autoturismul și se așteaptă ca analizorul să se sincronizeze cu microsenzorul.

Pasul 6. Pe ecranul analizorului trebuie să apară parametrii care urmează să fie măsurați. Imediat după, se introduce sonda de prelevare a gazului în țeava de eșapament a mașinii pe o distanță de 30 de cm.

Pasul 7. La ralanti, adică pentru turație 0, analizorul măsoară CO₂, O₂, CO, HC și λ și ulterior afișează valorile standardizate și valorile măsurate sub formă de tabel.

Pasul 8. Pentru o măsurătoare mai amănunțită, se apasă pedala de accelerație a mașinii pentru a varia numărul de turații. O turație se înregistrează în analizor doar dacă se menține constantă timp de 5 secunde.

Pasul 9. După finalizarea măsurărilor, se scoate sonda de prelevare cu grijă, deoarece este fierbinte din cauza încălzirii gazului de eșapament și se pune în locul destinat ei pe bancul analizorului. Se așteaptă revenirea analizorului la valorile de zero, apoi se închide.

Prima modalitate de monitorizare se referă la măsurarea cantității de CO₂, CO, O₂, λ și HC la o anumită turație. În general, primul test se face atunci când proprietarul unui autoturism este obligat să susțină Inspekția Tehnică Periodică. Pentru acest test, mașina trebuie să aibă motorul cald, pentru a preveni suprasolicitarea acestuia atunci când se turează pe loc. Înainte de a începe măsurarea, în calculatorul analizorului se introduc datele specifice mașinii: număr de înmatriculare, număr de kilometri, motorizarea mașinii și tipul de combustibil. După ce se introduc aceste date, se introduce OBD-ul în calculatorul mașinii pentru a putea măsura numărul de turații atunci când este nevoie. Tot testul durează aproximativ 5-6 minute, iar valorile acestuia sunt imprimate în mai puțin de 2 minute.

Un lucru interesant la acest test este faptul că pe foaia imprimată este o coloană în care sunt deja trecute valorile minime și maxime tolerate ale concentrațiilor compuşilor. De aceea, Inspekția durează foarte puțin.

Parametri măsurați	Intervale tolerate	Valori măsurate
Nr. turații (rpm)	1900-2500	1900
λ	0,97-1,03	1,012
CO ₂ (% vol)	0-20	15,61
CO (% vol)	0-0,3	0,02
O ₂ (% vol)	0-0,5	0,31

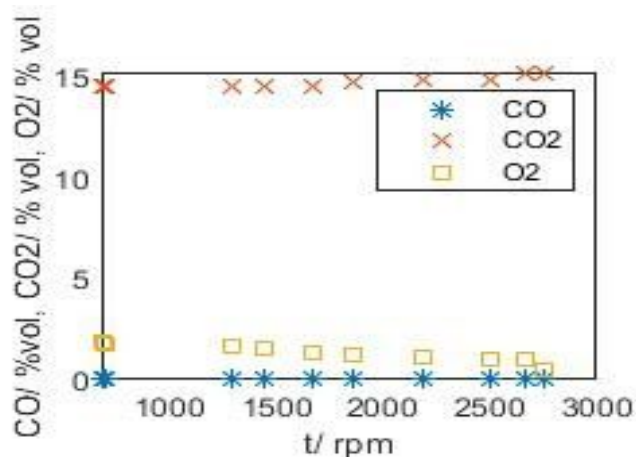
HC (ppm vol)	10-100	17
--------------	--------	----

La ralanti, turația motorului este de 500 rpm, dar nu este suficient de mare pentru analizor încât să poată înregistra valorile parametrilor.

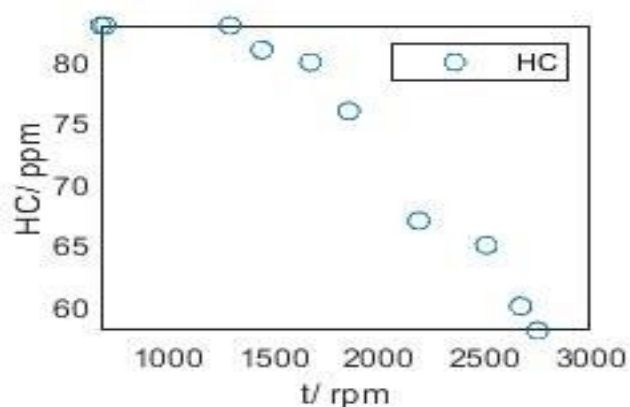
A doua modalitate de monitorizare constă în la măsurarea compuşilor la turații diferite.

El se face pentru a vedea în ce fel se schimbă cantitățile de compuși care trec prin analizorul de gaze, în funcție de turațiile mașinii. Tot aici apare și un parametru nou, temperatura. Acesta este măsurat automat pentru a vedea temperatura gazului de evacuare atunci când intră în analizor.

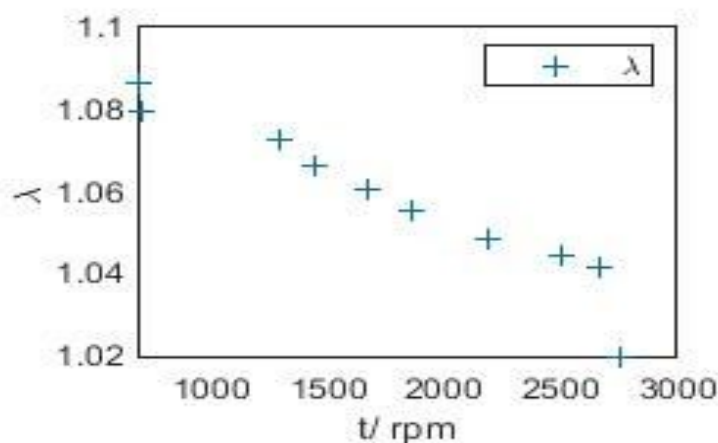
Nr. crt.	Nr.turații (rpm)	HC(ppm vol)	CO ₂ (% vol)	CO(% vol)	O ₂ (% vol)	λ	T(°C)
1	690	83	14,47	0,08	1,91	1,086	15
2	710	83	14,48	0,07	1,76	1,079	15
3	1300	83	14,48	0,07	1,62	1,072	15
4	1450	81	14,50	0,07	1,50	1,066	15
5	1680	80	14,53	0,06	1,38	1,060	15
6	1860	76	14,72	0,06	1,28	1,055	15
7	2190	67	14,78	0,06	1,11	1,048	15
8	2510	65	14,79	0,06	1,04	1,044	15
9	2670	60	15,17	0,06	0,98	1,041	15
10	2750	58	15,19	0,05	0,51	1,019	15



Dependențele CO₂, CO și O₂ în funcție de turație arată faptul că CO și O₂ tind să scadă încet, pe când CO₂ are o creștere lentă.



Hidrocarburile tind să scadă mai repede față de ceilalți compuși, atunci când valorile turației cresc.



Coeficientul de exces de aer scade semnificativ la început și la final, pe când la celelalte măsurători, are o scădere aproape liniară.

În final, prin compararea valorilor standard cu cele măsurate, se constată că autoturismul respectă normele metrologice în vigoare și că astfel, nu poluează mediul înconjurător.

Valorile CO₂ cresc odată cu turațiile, dar în intervalele admise, pe când CO și HC scad.

Catalizatorul are un rol important în schema de emisie a gazelor, deoarece acesta filtrează și minimizează cantitățile de compuși chimici din amestec.

